

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106446

旋翼无人机视觉/惯性组合导航技术研究

陈润泽^{1,2} 郝向阳¹ 陶健² 杨高杰²

(1. 信息工程大学 郑州 450001; 2. 南疆军区信息保障队综合信息服务中心 喀什 844000)

摘要: 随着旋翼无人机的日益发展且其任务中面临环境的复杂性不断提升,单一传感器已经表现出明显不足,因此需要有自主性更强的组合导航方法用以辅助其完成各类急难险重任务。从视觉、惯性的基本概念入手,较为全面地分析了此类组合的优势所在。而后对旋翼无人机的基本情况介绍,并着重分析以其为载体实现视觉/惯性组合导航的关键技术,包含视觉前端、初始化以及具体的融合方法。特别是对近几年表现出色的算法进行介绍,并分析了其优缺点,最后根据现有文献总结分析了当前针对旋翼无人机实现视觉/惯性组合导航需进一步深入研究的问题。

关键词: 旋翼无人机;视觉/惯性;组合导航;初始化;融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on integrated navigation of vision/inertial for rotorcraft

Chen Runze^{1,2} Hao Xiangyang¹ Tao Jian² Yang Gaojie²

(1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. Integrated Information Service Center of Information Support Team of Nanjiang Military Region, Kashi 844000, China)

Abstract: With the development of rotorcraft and the increasing complexity of the environment in many missions, single sensor has shown obvious deficiencies. Therefore, better autonomous navigation is needed to complete all kinds of urgent and dangerous tasks. Starting from the basic concepts of vision and inertia, this paper comprehensively analyzes the advantages of this kind of combination. Then, the basic situation of rotorcraft is introduced, and the key technologies of vision/inertial navigation based on rotorcraft are analyzed, including front-end for vision, initialization and fusion methods. Particularly, more outstanding algorithms in recent years are introduced, which help us understand their advantages and disadvantages better. Finally, according to the existing literature, problems that need to be further studied of vision/inertial integrated navigation for rotorcraft are summarized and analyzed.

Keywords: rotorcraft; vision/inertia; integrated navigation; initialization; fusion

0 引言

近年来,随着信息技术的不断发展,各类无人平台趋于丰富。其中以旋翼无人机的发展最为迅速,并且广泛应用于航拍、植保、安防等众多领域。但在复杂的未知环境中,旋翼无人机实现独立自主飞行仍存在很多难题。惯性导航以其自主性强、使用范围广以及输出信息丰富等特点成为无人平台的必备导航方式,但由于误差随时间累计较快,无法进行长时间的精确导航。通常卫星/惯性组合导航系统(global positioning system/inertial navigation system, GPS/INS)用于解决此类问题,但在室内或外界遮挡较多的情况下存在GPS信号容易受到干扰或丢失的问题,特别是对于信息化作战或执行复杂环境下的保障任务。此时,针对GPS失效下导航模式的研究逐渐多样化^[1],自主导航的作用日趋重要。其中,视觉/惯性组合导航逐渐成为旋翼无

人机的首选自主导航模式。简言之,选择视觉与惯性信息进行结合是由于视觉导航稳定性较强,误差随时间累计速度慢,与惯性导航结合可以达到协同超越的目的。针对无人机平台的视觉导航研究^[2-4]指出了纯视觉导航在无人机上应用的关键技术、优势以及不足。利用惯性导航的瞬时高精度位姿信息来辅助视觉导航提升导航精度也是组合的优势所在。在融入惯导数据后,即使相机由于运动过快而短暂失效,也能保持一个较稳定的位姿估计,同时提供尺度信息,这是纯视觉方法无法做到的。此外,惯性信息能够感受到自身的运动信息,从而降低动态目标对位姿估计精度的影响。在该自主导航模式的支持下,能够研究得到旋翼无人机在续航能力允许的情况下可以保持的飞行高度、飞行距离等指标,这些指标为其外出执行任务提供有力的理论支撑。

收稿日期:2021-04-21

1 旋翼无人机种类及应用

旋翼无人机是一种社会各界广泛使用的无人智能飞行器,可以代替人工完成许多未知区域的探索 and 任务。其特点在于便于人员操作,可以完成悬停且机动性较强。目前,旋翼无人机在各类应用场景中比较常见,但续航能力相对较差。此外,机身根据承重大小可搭载不同传感器进行辅助测量,如惯性导航元件、相机、雷达等。这些传感器都可以提供丰富的信息用于融合处理并提升飞行器导航精度。

根据旋翼无人机平台的构型主要分为四旋翼和六旋翼两种,如图 1 所示,四旋翼使用范围更为广泛。旋翼无人机按大小可分为微型、轻型、小型以及大型。通常微型无人机多用于解决室内或是狭小空间内的导航定位问题,由于其机身较小,能够在室内障碍物较多的情况下较为灵活的移动。大型无人机多用于室外空旷的环境,如自主着陆、空中运输任务等。并且,由于其尺寸较大、结构稳定,可以同时搭载多台传感器,融合多源信息,从而实现精准导航,更好地辅助旋翼无人机完成各类任务。

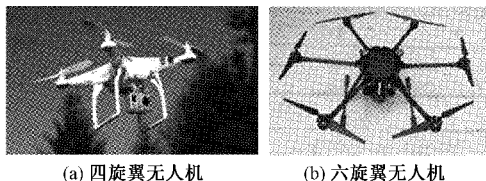


图 1 常用无人机平台

2 旋翼无人机视觉/惯性组合导航关键技术

2.1 图像数据预处理

在融合视觉和惯性信息之前,对两种信息进行预处理是不可缺少的过程。特别是旋翼无人机获取的数据,与地面车采集的二维数据具有本质区别。通常,惯性数据完成标定过程即可,但是对于图像数据则需要有内参标定、畸变校正以及其他相关的预处理工作。首先,在不同拍摄场景及运动状态下对旋翼无人机获取的图像进行分析。室内环境下,飞行速度较低、位置变化小,且一般场景中结构化目标较多;而室外环境下,飞行速度较快、高度较高,相对人造建筑,场景中更多的是自然特征。旋翼无人机的飞行状态、飞行速度以及姿态变化很大程度上影响了相邻帧间特征点匹配的数量和精度。

其次,对于图像的获取样式主要有两种模式:1)是俯视图获取,此类图像通常来源于室外,飞行高度较高,且随着机体高度的上升可以获取的环境信息也逐渐丰富,一般相邻帧不会出现很大的变化;2)是正视图获取,此类图像多用于室内,要求飞行高度较低,可以看见机体正前方的图像信息,通常更有利于完成视觉避障等任务,但是当机体发生大幅度转动时图像也会有较大的变化,可能造成特征丢失情

况。总的来说,前者图像序列较后者更为稳定,但是特征信息不如后者丰富,应权衡实际需求进行选择。

针对旋翼无人机采集图像数据可能存在的不稳定情况,如机体转动幅度较大或是运动速度较快导致的特征丢失等问题。对当前常用的特征点匹配、跟踪算法进行对比分析,选择较稳定的特征提取算法作为视觉前端,重点分析特征点提取的数量与质量。根据特征提取的具体情况,必要时可设置相邻特征点间的最小间隔,保证特征较为均匀的分布,并用随机抽样一致算法(random sample consensus, RANSAC)剔除外点^[5],从而为后期的视觉/惯性组合导航提供稳定数据源。此外,在读取图像的同时设置有效的关键帧选取策略对位姿估计的精度和算法实时性的提升同样具有重要意义。同时,还可以考虑融合一般的特征点提取方法和直接法,让算法本身更具鲁棒性,能够适应不同场景的要求^[6]。

目前视觉/惯性组合常用框架的视觉处理方法及优缺点如表 1 所示。根据表中各类框架的实际情况及优缺点分析可知,采用加速分割测试特征(features from accelerated segment test, FAST)或 Shi-Tomasi 提出的用于跟踪的高质量特征(good feature to track, GFTT)与光流法跟踪结合更适合旋翼无人机组导航的视觉前端,该方法能够满足旋翼无人机实时性要求高、机动性强的特点。

2.2 视觉/惯性系统初始化

由于视觉/惯性组合系统的非线性较强,无论是基于滤波或是基于优化的方法都需要鲁棒性强的初始化算法。特别是对于旋翼无人机来说,数据的复杂程度更高,更需要良好的初始化算法来提供准确的初始值。以此在后期提升导航精度的同时减少迭代计算次数,保证高效率的导航解算。

对于优化的方法,文献[14]除了提出一种在线标定外参的方法外,还提出了一种紧耦合的系统初始化方式,同时估计视觉特征点的深度、相机的平移、重力以及速度,此法获取的初始数据丰富但整体计算量较大。此外,VI-ORB 提出了一种松耦合的初始化方法,是目前比较常用的一种初始化方法。首先利用单目视觉里程计^[15](visual odometry, VO)进行初始化,得到了三维空间中一系列相机位姿和地图点。同时,通过不断对惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的测量数据进行预积分,得到每两个关键帧之间的预积分量,与视觉方法计算出的位姿信息对齐,得到 IMU 的陀螺仪偏置。之后,依次估计尺度以及重力方向、加速度计偏置、速度等信息,在简化初始化难度的同时增加迭代计算的过程,从而得到更为全面、准确的初值。VINS-Mono 采用的初始化方法与 VI-ORB 相似,也是先利用 VO 得到关键帧和地图点。不同之处在于:1)是此法的视觉前端利用光流法完成,整体运行速度有较大提升;2)是此法将速度作为未知变量估计出来且整个过程忽略了加速度计的偏差,初始化信息不全面。而后,2020 年 Campos 等^[16]提出的基于最大后验估计的方法,前期先利

表 1 视觉/惯性组合常用框架

VI 框架	视觉前端	优点	缺点
MSCKF ^[7] (2007)	FAST+光流法跟踪	拓展卡尔曼滤波滤波器估计, 速度最快。	精度较低。
OKVIS ^[8] (2015)	FAST+二进制鲁棒尺度不变关键点 (binary robust invariant scalable keypoints, BRISK)	具有旋转不变性和尺度不变性, 精度高。	计算量大, 速度较慢。
ROVIO ^[9-10] (2017)	FAST 提取+光度误差 (稀疏直接法)	光度误差模型用于滤波更新, 精度较高。	计算复杂, 精度一般。
VINS-Mono ^[11] (2017)	GFTT 提取+光流法跟踪	特征点提取有打分机制, 特征质量高。	受光照变化影响, 跟踪不稳定。
VI-ORB ^[12] (2017)	有向 FAST 和旋转 BRIEF (oriented FAST and rotated BRIEF, ORB)	具有旋转不变性和尺度不变性, 速度较快。	鲁棒性不强, 容易出现错误匹配情况。
OpenVINS ^[13] (2020)	FAST+高斯函数差分 (difference of Guassian, DOG)+3 种跟踪器	DOG 辅助更准确的提取特征, 3 种跟踪器满足各类需求。	静止状态开始初始化, 不利于后期计算收敛。

用单目视觉启动, 充分考虑了惯性数据的不确定性, 进行了仅惯性的参数优化, 提升了初始化速度。

对于滤波的方法, Fang 等^[17]提出了一种基于多状态卡尔曼滤波 (multi-state constraint Kalman filter, MSCKF) 改进的初始化方法。该方法是基于三视图几何约束和 sigma-point 滤波器完成的, 可以在 3 个连续的可视帧内完成视觉/惯性系统的初始化, 是一种快速的初始化方法。此外, 其在初始化阶段生成的状态向量与 MSCKF 框架一致, 后期可以与导航过程无缝对接, 完成精确的状态估计。此法处理速度相对优化方法有较大地提升, 但是精度还有待提升。

目前的视觉惯性里程计 (visual inertial odometry, VIO) 初始化方法大多比较复杂, 虽然经过初始化后可以得到较为准确的初值信息, 但是初始化时间较长, 并且容易产生初始化失败的问题, 需要多次初始化直至成功。以上问题都会对旋翼无人机起飞前的初始化阶段造成较大的影响, 进而导致后期导航解算无法正常推进。所以, 在保证初始化精度的前提下提升效率仍是值得深入研究的内容。

2.3 常用视觉/惯性组合方法

目前, 传统视觉/惯性组合模式主要分成松耦合和紧耦合两类, 对于融合后数据的处理方式可以分为基于滤波的和基于优化的方法^[18]。松耦合过程并未将图像特征信息加入到状态向量中, 仅依靠 IMU 自身的运动方程来进行预测, 然后通过 VO 的输出位姿作为量测值更新。虽然该模型的向量维度较小且系统的建立相对简单, 但是融合精度较紧耦合方式而言相对逊色, 并且缺乏了对图像信息的充分利用, 仅适用于平台计算量较低的应用场景。另一方面, 紧耦合则将图像特征信息加入到了状态向量中, 随着整体不断地预测更新, 状态向量维数会随着相机运动时间积累而迅速增加, 使得计算负载变大, 难以满足实时性

要求, 特别是对旋翼无人机负载的计算机性能提出很大挑战。文献[19]对目前适合于无人机的单目 VIO 框架进行整理, 并利用公开的旋翼无人机数据集进行测评, 着重分析其精度及运算效率, 最终对不同框架的优缺点及场景适用性给出分析结果。在此基础上, 结合视觉/惯性组合框架的具体分类和涉及到的常用算法整理如图 2 所示, 图中对各类框架的提出和发展情况进行了梳理。其中融合算法主要分为基于滤波的松耦合、基于滤波的紧耦合和基于优化的紧耦合 3 类, 具体框架下算法的发展情况和优缺点分析如下。

对于滤波松耦合模式, 通常采取滤波的方法。此类方法较早被研究使用, 目前已经发展成熟, 其在旋翼无人机上实施的优势在于操作简单、计算轻便, 但由于精度相对紧耦合差距较大, 因此近几年使用较少。比较经典的方法有 Lynen 等^[20]提出的针对微小飞行器 (micro aerial vehicles, MAV) 的多传感器融合方法, 理论上能够处理无限数量的不同传感器和它们之间的延迟信息, 同时允许传感器进行在线的自校准。近几年, Faessler 等用计算轻量的半直接视觉里程计 (semi-direct monocular visual odometry, SVO) 与多传感器融合框架 (multi-sensor fusion, MSF) 进行组合^[21]。肖尧等^[22]提出的 SVO/INS 组合模式, 此类方法在运算效率上都有很好的保障, 多用于微型无人机。对于紧耦合模式, 可分为基于滤波和优化两种方式。基于滤波的方法有 Mourikis 等提出的 MSCKF, 其优势在于利用特定图像特征的所有相机姿态之间的几何约束, 而滤波器的状态向量中不包含特征点的三维坐标, 计算的复杂程度只在特征数量上是线性的, 很大程度上减轻了计算负担。但缺点是对一系列路标的测量值处理要被延后到对其所有测量都获取到的时候进行, 不能利用当前所有的视觉信息进行估计, 影响了滤波器输出的位姿精度。之后, 他的学生李明阳在 2013 年提出了

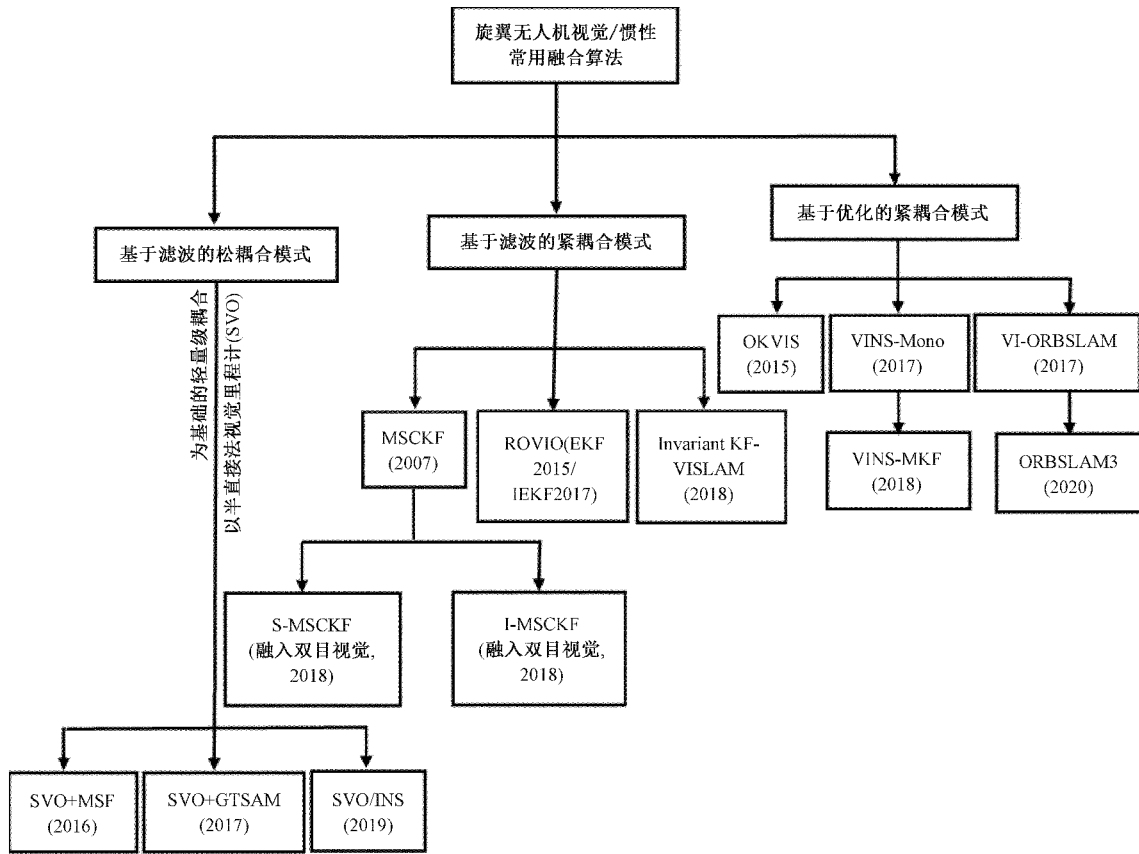


图 2 旋翼无人机视觉/惯性常用融合算法

MSCKF2.0, 主要对 MSCKF 的可观性问题进行了改进。近几年比较知名的算法有 MSCKF 的双目改进版本 S-MSCKF^[23], 此法用于高动态旋翼无人机飞行中的导航位姿解算, 允许的最高飞行速度可达 17.5 m/s。此外, 黄剑雄等^[24]提出了一种基于自适应卡尔曼滤波的视觉/惯性组合导航方法, 能够保证多场景下的导航精度。综上, 此类方法由于数据处理速度较快、融合计算简单, 多用于载体的实时位姿状态估计, 特别是对于运动速度和反应要求较高的小型无人设备。

对于滤波紧耦合的方法, 目前常用 EKF 模型进行处理, 许多学者针对旋翼无人机的使用提出了该模型的不足之处。如滤波过程中的一致性问题和复杂的雅克比求取问题等等。近几年, 有部分学者引入了矩阵李群的思想来解决此类问题, 特别是应用于面向旋翼无人机的视觉/惯性组合导航算法, 取得了较好的效果。文献[25]提出了一种基于李群和李代数思想的 VIO 算法, 包括基于姿势的李群表示的过程模型(与欧氏表示相反), 基于李代数上的分布的过程和观测噪声模型以及使用并行传输来处理测量更新, 并通过实验验证了该方法在不同速度下的正确性以及对于自主导航和地图绘制的兼容性。之后, 不变卡尔曼滤波被引入视觉惯性同步定位与建图(visual inertial simultaneous localization and mapping, VI-SLAM), 组合

导航算法的一致性和精度都得到了较大的提升^[26]。国内诸如此类的研究^[27-28]也表明了该滤波框架的优势。

另外, 基于优化紧耦合的方法, 近几年也被广泛应用在很多算法中。OKVIS 使用了基于关键帧的滑动窗口, 代价函数由视觉路标的加权重投影误差和加权的惯性导航误差项组合而成, 最后进行非线性优化。针对 IMU 数据在优化中重复积分的问题, 许多学者进行了研究, 并首次提出了 IMU 预积分技术^[29]。Forster 等^[30]对预积分技术进行了完善, 有效缓解了后端优化的计算复杂度, 为构建快速鲁棒的视觉惯性导航系统(visual inertial navigation system, VINS)打下了坚实的基础。VI-ORB 将惯性信息与 ORB-SLAM2 进行结合, 采用 ORB 算法进行特征点的提取和匹配, 具备回环检测和构图功能, 整体精度相比纯视觉模式有一定提升且鲁棒性较高。同时, 随着关键帧提取、滑动窗口、IMU 预积分等优化算法逐渐成熟, 国内专家学者做了很多工作。港大沈老师课题组提出了 VINS-Mono 算法, 该算法具备动态初始化、在线外参标定、重定位、闭环检测等功能, 是一种针对单目相机实现的基于优化的算法。此算法功能丰富且鲁棒性较好, 但是运行速度较慢, 还有提升的空间。在此基础上, 有大量学者对 VINS 系统进行不同的改进, 使其应用更为广泛。VINS-MKF^[31]融合了多种传感器的测量信息, 是一种多关键帧、

紧耦合、视觉惯性精确状态估计的非线性优化方法。此类方法能考虑全局,将全部状态放在一起进行优化,虽然状态估计精度有较大提升,但通常由于系统的非线性和计算复杂等问题运行速度较慢。特别是对于旋翼无人机来说,更多的是用于后期的精度测评工作。

针对旋翼无人机自主导航时面临的具体问题和场景,可根据融合模式和数据处理方法来选择合适的组合框架。总体而言,这些融合方法都能较好解决两种数据的对齐问

题、算法的鲁棒性以及优化等问题。目前,旋翼无人机视觉/惯性组合导航还是以滤波的方法为主,但使用此法的同时提升位姿估计精度以及算法鲁棒性还是可以深入研究的问题。

2.4 融合深度学习的方法

有关深度学习的融合方法分类如图 3 所示,主要分为语义信息和目标跟踪两大类,具体融合实例以及优缺点可结合实际场景需求和存在问题重点分析。

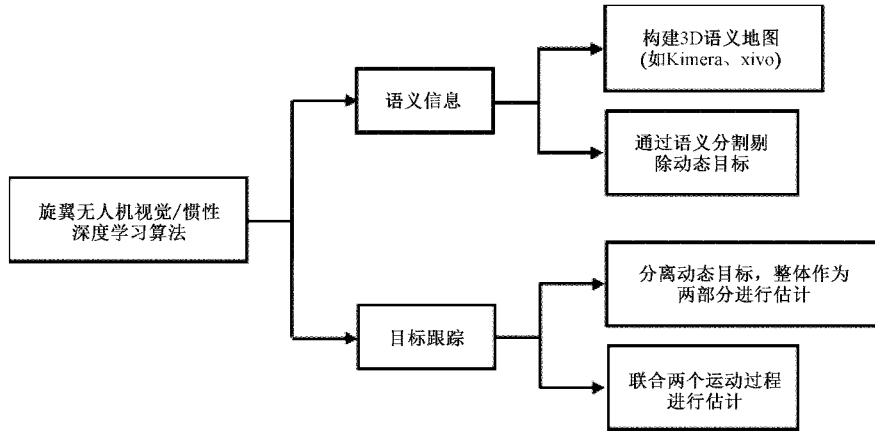


图 3 融合深度学习的旋翼无人机视觉/惯性算法

1) 联合语义信息导航

目前,在视觉/惯性组合导航的视觉处理部分,除了利用点线特征融合构建目标几何特征提供场景语义信息外^[32],使用深度学习的方法提供语义信息也是近两年常见的方法。我们需要解决的主要问题是更好地融合深度学习与视觉/惯性组合算法,在保证算法速度的同时提升鲁棒性。Rosinol 等^[33]提出了一个能够完成实时语义度量的定位、建图开源库,主要包括 4 个模块:包含双目视觉和 IMU 的视觉惯性里程计、一种鲁棒的位姿图优化方法、一个快速计算 3D 网格用于避障的模块、一种稠密 3D 语义场景重建方法。这 4 个模块可以单独运行,也可以任意结合或是和其他算法进行融合。同时,此法涵盖 VIO、SLAM、三维重建及语义分割等多个领域的内容,可以作为后期语义 SLAM 深入研究的基础模块。

针对旋翼无人机的语义信息融合还比较少,一般都是将深度学习作为一部分对视觉/惯性组合框架中的内容进行替换,表现出不错的效果。Li 等^[34]对无人机在地下隧道动态环境中的定位提出了一种新的融合语义信息的视觉惯性组合方法,此法通过 ENet 模型进行语义分割,提取并去除动态目标的影响,然后采用 ORB 算法进行特征点提取、光流跟踪,最后采用紧耦合优化的框架融合 IMU 信息完成传感器的位姿估计,相比 VINS-Mono 系统有更强的针对性,精度有明显提升。余洪山等^[35]针对特征点提取方法改进后提出了融合 Super Point 网络的单目视觉/惯性系统,该方法能够有效改善其在光照变化剧烈场景下的

定位精度。

2) 联合目标跟踪导航

针对动态目标长期稳定存在的情况,仅对携带传感器的载体进行位姿估计和场景重建已经远远不够,对动态目标进行识别、跟踪也是我们需要考虑的内容。王耀南等^[36]提出了一种适用于旋翼无人机的视觉跟踪算法,但是未考虑融合其他传感器信息。

早期,将载体自身位姿估计与目标跟踪相结合的算法有 Wang 等^[37]提出的带有移动目标跟踪的 SLAM 技术,此法将 SLAM 与目标跟踪分为两个单独的模块进行估计,并建立模型进行数据关联,不足在于估计中仅考虑使用视觉传感器,同时两个模块的耦合度不高,不能达到很好的精度提升效果。事实证明,动态目标在载体的位姿估计中不可忽视,准确建立两者在位姿估计中的模型,可以有效提升载体自身位姿的估计精度。

近年来,有更多鲁棒的算法被提出,Chen 等^[38]提出了一种基于视觉、雷达、惯性导航和机载计算平台的四旋翼无人机在复杂环境下追踪动态目标的算法。该方法使用 RGB-D 相机作为视觉传感器,同时用带有人工标识码的小车作为动态跟踪目标,并且根据运动环境的复杂性采用激光雷达进行精准测距,但是对于人工标志的依赖性较强。对于 3D 目标跟踪,Qiu 等^[39]提出了基于 VINS-Mono 的对象跟踪系统,该系统可以实现任意动态对象的尺度恢复和连续六自由度的姿态估计,主要通过分析相机运动与跟踪目标运动之间的时间统计关系来进行度量尺度估计。此

法的优点在于可以把整体分为 4 个模块: VINS、局部 BA 系统、2D 跟踪器和基于相关性分析的度量尺度估计器,且 4 个模块可以根据实际需求进行替换,便于灵活处理。

以上算法的不足之处在于均未考虑将载体自身运动估计和目标跟踪添加到一个框架中进行优化,达到彼此相互促进的目的。针对此问题,Eckenhoff 等^[10]提出了一种紧密耦合的系统将视觉惯性位姿估计结果与 3D 目标跟踪进行融合,同时提升两个模块的精度。该算法把跟踪目标建模为刚体,可以更全面地获取目标的几何、位姿信息,从而促进 VINS 的精度提升。对于状态向量的构建,除 MSCKF 中的确定的 IMU 状态外,还需考虑跟踪目标的状态向量。从后期发展来看,同时解决视觉/惯性组合导航与多目标跟踪问题更具现实意义,其中适当利用深度学习提升目标检测、跟踪的精度逐渐成为主流方法。

3 结 论

总的来说,视觉/惯性组合导航技术由于其低成本、便携以及高度自主等一系列优点而被广泛应用于各类智能化场景,并逐渐发展成为导航方向的研究热点。虽然该技术在近几年有很多突破和进展,但随着各类无人平台的日趋成熟,针对旋翼无人机进行组合导航研究还有许多值得深入的内容。

1) 目前用于视觉/惯性或纯视觉测评的无人机数据集大多都是室内环境,通常情况下室内环境的纹理较为丰富,对于导航精度的提升具有一定作用。但实际上,旋翼无人机能够在室外复杂场景下完成各类任务才是我们迫切需要的,因此旋翼无人机在室外自主飞行的相关指标是有待研究的内容。

2) 当旋翼无人机在室外自主飞行时,图像序列中出现动态目标是不可避免的。而目前对于动态目标产生的影响考虑较少,需要进行准确分析。该问题主要包括两种情况:一是短时动态目标,可以通过图像分割剔除目标;二是长时动态目标,可以采用增加约束的方法同时估计自身和动态目标轨迹。结合具体情况进行深入研究是十分必要的。

3) 目前视觉/惯性组合导航算法多见于用视觉导航的结果去校正惯性导航,从而获得较准确的位姿信息。但是,当旋翼无人机飞行速度较快、转动角度过大时,可能导致图像特征丢失,造成短时间内图像信息不可用等问题。针对此问题,怎样利用惯性信息的瞬时高精度去弥补组合导航精度是我们需要考虑的问题。

4) 近两年深度学习的方法日趋成熟,但是旋翼无人机因其客观条件,无法搭载运算效率很高或体积较大的计算模块。如何把深度学习的方法引入旋翼无人机的自主导航并保持实时性也是后期需要考虑的难点。

参考文献

- [1] 柳明. GPS 失效下的无人机组组合导航系统[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2015, 29(2): 129-132.
- [2] 吴显亮, 石宗英, 钟宜生. 无人机视觉导航研究综述[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(S1): 62-65.
- [3] 王冠政, 汪海洋, 程志伟, 等. vSLAM 在无人机平台上的发展研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(14): 8-14.
- [4] 赵良玉, 朱叶青, 金瑞. 多旋翼无人机单目 V-SLAM 研究综述[J]. 航空兵器, 2020, 27(2): 1-14.
- [5] 张峻琦, 胡立坤. 融合 RANSAC 光流跟踪法和特征点匹配法的视觉里程计[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1214-1221.
- [6] 雷皓玮, 林晓煊. 一种混合单目视觉 SLAM 系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 90-96.
- [7] MOURIKIS A I, ROUMELIOTIS S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation [C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2007, DOI: 10.1109/ROBOT.2007.364024.
- [8] LEUTENEGGER S, LYNNEN S, BOSSE M, et al. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 34(3): 314-334.
- [9] BLOESCH M, OMARI S, HUTTER M, et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, 2015: 298-304.
- [10] BLOESCH M, BURRI M, OMARI S, et al. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback[J]. The International Journal of Robotics Research, 2017, 36(10): 1053-1072.
- [11] TONG Q, LI P, SHEN S. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004-1020.
- [12] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. Visual-inertial monocular SLAM with map reuse[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2016, 2(2): 796-803.
- [13] GENEVA P, ECKENHOFF K, LEE W, et al. OpenVINS: A research platform for visual-inertial estimation[C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196524.
- [14] YANG Z, SHEN S. Monocular visual-inertial state estimation with online initialization and camera-IMU extrinsic calibration [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 39-51.
- [15] NISTER D, NARODITSKY O, BERGEN J R. Visual odometry[C]. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, DOI: 10.1109/CVPR.2004.1315094.

- [16] CAMPOS C, MONTIEL J, TSRDOS J D. Inertial-only optimization for visual-inertial initialization[J]. 2020 International Conference on Robotics and Automation, 2020, DOI:10.1109/ICRA40945.2020.9197334.
- [17] FANG W, ZHENG L. Rapid and robust initialization for monocular visual inertial navigation within multi-state Kalman filter[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 31(1): 153-165.
- [18] 张礼廉,屈豪,毛军,等. 视觉/惯性组合导航技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(4): 50-63.
- [19] DELMERICO J, SCARAMUZZA D. A benchmark comparison of monocular visual-inertial odometry algorithms for flying robots [C]. IEEE, 2018: 2502-2509.
- [20] LYNEN S, ACHELIK M W, WEISS S, et al. A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation [C]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 3923-3929.
- [21] FAESSLER M, FONTANA F, FORSTER C, et al. Autonomous, vision-based flight and live dense 3D mapping with a quadrotor micro aerial vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(4): 431-450.
- [22] 肖尧, 阮晓钢, 朱晓庆, 等. 一种微型无人机单目视觉 SVO/INS 组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019(2): 211-219.
- [23] SUN K, MOHTA K, PFROMMER B, et al. Robust stereo visual inertial odometry for fast autonomous flight[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 965-972.
- [24] 黄剑雄, 刘小雄, 章卫国, 等. 基于视觉/惯导的无人机组合导航算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 137-143, 149.
- [25] LOIANNI G, WATTERSON M, KUMAR V. Visual inertial odometry for quadrotors on SE(3)[C]. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2016, DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487292.
- [26] BROSSARD M, BONNABEL S, BARRAU A. Invariant Kalman filtering for visual inertial SLAM [C]. International Conference on Information Fusion, 2018, DOI: 10.23919/ICIF.2018.8455807.
- [27] 王景琪, 刘海颖, 王馨瑶, 等. 基于李群的视觉/惯性组合导航算法[J]. 导航定位学报, 2020, 8(2): 36-42.
- [28] 闫德立, 喻薇, 宋宇, 等. 基于矩阵李群表示及容积卡尔曼滤波的视觉惯导里程计新方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(8): 1823-1832.
- [29] LUPTON T, SUKKARIEH S. Visual-inertial-aided navigation for high-dynamic motion in built environments without initial conditions [J]. IEEE Press, 2012, DOI: 10.1109/TRO.2011.2170332.
- [30] FORSTER C, CARLONEL, DELLARRT F, et al. On-manifold preintegration for real-time visual-inertial odometry[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(1): 1-21.
- [31] ZHENG C, LIU Y, WANG F, et al. VINS-MKF: A tightly-coupled multi-keyframe visual-inertial odometry for accurate and robust state estimation[J]. Sensors, 2018, 18(11): 4036.
- [32] HE Y J, ZHAO J, GUO Y, et al. PL-VIO: Tightly-coupled monocular visual-inertial odometry using point and line features [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(4): 1159.
- [33] ROSINOL A, ABATE M, CHANG Y, et al. Kimera: An open-source library for real-time metric-semantic localization and mapping [J]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2020, DOI:10.1109/ICRA40945.2020.9196885.
- [34] LI D, YANG W, SHI X, et al. A visual-inertial localization method for unmanned aerial vehicle in underground tunnel dynamic environments[J]. IEEE Access, 2020(99): 1-1.
- [35] 余洪山, 郭丰, 郭林峰, 等. 融合改进 SuperPoint 网络的鲁棒单目视觉惯性 SLAM[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 116-126.
- [36] 王耀南, 罗琼华, 毛建旭, 等. 旋翼飞行机器人的行人视觉跟踪方法及系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 97-107.
- [37] WANG C, THORPE C, THRUN S, et al. Simultaneous localization, mapping and moving object tracking [J]. International Journal of Robotics Research, 2007, 26(9): 889-916.
- [38] CHEN J, LIU T, SHEN S. Tracking a moving target in cluttered environments using a quadrotor [C]. Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016: 446-453.
- [39] QIU K, QIN T, XIE H, et al. Estimating metric poses of dynamic objects using monocular visual-inertial fusion [J]. International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018: 62-68.
- [40] ECKENHOFF K, YANG Y, GENEVA P, et al. Tightly-coupled visual-inertial localization and 3D rigid-body target tracking [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019(99): 1-1.

作者简介

陈润泽, 硕士, 主要研究方向为计算机视觉、无人机控制、组合导航。

E-mail: 564187682@qq.com

郝向阳(通信作者), 教授, 主要研究方向为计算机视觉、视觉导航、多视图几何。

E-mail: xiangyanghao2004@163.com